

引用格式: LI Bin, WANG Xiaofang, KANG Yan, et al. Experimental Analysis of Coherent Velocity Measurement Based on Near-infrared Single-element SPAD Detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(1):0104001

李彬, 王晓芳, 康岩, 等. 基于近红外单元单光子雪崩二极管的相干测速实验分析[J]. 光子学报, 2024, 53(1):0104001

# 基于近红外单元单光子雪崩二极管的相干测速实验分析

李彬<sup>1</sup>, 王晓芳<sup>2,3</sup>, 康岩<sup>2</sup>, 岳亚洲<sup>1</sup>, 李薇薇<sup>2,3</sup>, 张艺馨<sup>1</sup>, 雷宏杰<sup>1</sup>, 张同意<sup>2,3</sup>

(1 中国航空工业集团公司 西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为分析死时间、暗计数等因素对单光子相干测速性能的影响,搭建了基于近红外单元单光子雪崩二极管探测器的外差相干测速实验系统,实验分析了探测器暗计数率和信号探测光子计数率对多普勒信息重建的影响,以及由探测器死时间决定的饱和计数率限制下的最优信号探测光子计数率。在 1  $\mu$ s 探测器死时间、1 ms 采集时间下,分别对 1.8 kHz、52.4 kHz 和 194.4 kHz 探测器暗计数率影响下的光子到达时间序列进行快速傅里叶变换,从频谱数据中提取拍频信号。实验结果表明,随着光子计数率的增加,相干拍频信号频谱信噪比逐渐增大而后趋于平稳,当接近饱和计数率时,在相干拍频信号频谱低频区域和拍频频率两侧出现了谐波分量,谐波频率间距与光子计数率数值基本相等,受谐波影响较小的最优光子计数率约为单光子探测器饱和计数率的 90%。研究结果可为全光纤单光子多普勒测速雷达技术的发展和應用提供参考。

**关键词:**相干探测;光子计数;外差探测;多普勒;测速

中图分类号: TP79

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245301.0104001

## 0 引言

与非相干激光雷达相比,相干激光雷达能够基于多普勒效应进行目标速度的直接测量。同时,相干体制的激光雷达具备较好的抗太阳光等噪声干扰能力和接近散粒噪声极限的探测能力,在风场探测、飞机空速测量和运动目标速度测量等领域具有广泛应用<sup>[1-4]</sup>。相干探测可以分为提取光频率信息的外差探测和提取光相位信息的零差探测,对于速度测量通常采用外差探测来提取回波光信号的多普勒频移,进而反演目标速度。经典的激光外差测速雷达系统通常采用常规的光电二极管探测器,如正-本征-负(Positive-intrinsic-negative, PIN)光电二极管探测器,这类探测器对少量回波光信号的探测能力有限,且一般要求足够强的本振光功率以抑制探测系统的热噪声和电路噪声,但是过强的本振光容易产生过剩的散粒噪声<sup>[5]</sup>。随着低电路噪声的单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)探测器技术的发展,不仅为少量回波光信号的探测提供了手段,而且能以极低的本振光功率实现接近散粒噪声极限的探测性能<sup>[6-7]</sup>。SPAD探测器因具备体积小、功耗低、无需低温或真空部件等特点,已在系统结构较简单的直接探测体制激光雷达中得到广泛的研究和应用,如百多公里远程卫星测距<sup>[8-9]</sup>、远距离单光子三维成像<sup>[10-11]</sup>、机载陆地测绘<sup>[12]</sup>、水下等复杂环境中三维成像<sup>[13-14]</sup>、基于鉴频器的直接探测多普勒测速等<sup>[15]</sup>。相比而言,基于单光子探测的相干体制激光雷达的研究较少,距离实际应用的差距相对较大。2006年,美国林肯实验室的LUU J X

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 62001473, 62171443), 陕西省重点研发计划(No. 2022GY-009), 西安市青年人才托举计划(No. 095920211305)

**第一作者:**李彬, libinemail@163.com; 王晓芳, wangxiaofang@opt.ac.cn

**通讯作者:**康岩, kangyan@opt.ac.cn; 张同意, tyzhang@opt.ac.cn

**收稿日期:**2023-06-05; **录用日期:**2023-09-11

<http://www.photon.ac.cn>

等率先演示验证了基于  $32 \times 32$  像素近红外 SPAD 阵列探测器的外差测速, 实验采用了  $1\ 064\ \text{nm}$  光纤激光器, 通过  $4\ 000$  个探测周期 ( $1\ 500\ \text{ns}$ ) 的累积测量, 实现了相干拍频信号的频谱重建<sup>[16-17]</sup>。随后他们进一步提出了本振光功率弱至每个相干积分周期内仅几个光子下的外差探测理论<sup>[6]</sup>。2012年, LIU Lisheng 等基于多像素光子计数器 (Multi-pixel Photon Counters, MPPC) 搭建了单光子外差测速实验系统, 并提出从相邻光子时间间隔所满足的概率密度分布来解析相干拍频信号<sup>[18]</sup>。2017, LOBANOV Y 等提出利用超导纳米线单光子探测器来减小外差探测过程中死时间效应的影响<sup>[19]</sup>。2021年, CHEN Zhen 等基于硅基 SPAD 单元探测器和  $780.2\ \text{nm}$  连续激光源搭建了单光子外差测速实验系统, 并引入压缩感知算法重建相干拍频信号频谱, 实现了比常规快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 方法更高的频谱重建信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR)<sup>[20]</sup>。2022年, LU Wei 和 GE Weijie 等基于  $64 \times 64$  像素的近红外 SPAD 阵列和  $1.5\ \mu\text{m}$  光纤激光器搭建了单光子外差测速实验系统, 并提出多脉冲相位同步方法实现时域累积的相干拍频信号频谱 SNR 增强<sup>[21-22]</sup>。

综上所述, 目前国内外在单光子相干测速方面的研究先后采用了近红外谱段的 InGaAs-SPAD 阵列探测器和超导纳米线单光子探测器、可见光谱段的硅基单元 SPAD 探测器和 MPPC 探测器, 但少有基于单元 InGaAs-SPAD 探测器的单光子外差测速实验研究报道。基于近红外单光子探测器的外差测速系统可在  $1.5\ \mu\text{m}$  波段进行全光纤集成, 未来更容易走向机载等实际工作平台的应用。虽然单元 InGaAs-SPAD 的光子计数探测动态范围不如 SPAD 阵列, 但是 SPAD 阵列探测器的低像元填充率、各像素性能差异大及其帧周期模式的数据读出方式一定程度上限制了其最佳工作性能<sup>[23-24]</sup>。同时, 与超导纳米线单光子探测器相比, 单元近红外 SPAD 也不需要极其复杂和庞大的低温制冷部件。

本文基于  $1.5\ \mu\text{m}$  窄线宽光纤激光器和单元 InGaAs-SPAD 单光子探测器开展了单光子外差测速实验研究。重点分析了单光子探测器死时间、暗计数噪声和信号探测光子计数率对相干拍频信号频谱重建的影响, 研究结果可为全光纤单光子多普勒测速激光雷达技术的发展和應用提供参考。

## 1 实验系统

图 1 为基于单元 InGaAs-SPAD 单光子探测器搭建的外差测速实验系统原理图。实验所采用的激光器为 Orbits Lightwave 公司生产的低噪声、窄线宽光纤激光器 ETH-180-1550.00-5-PZ10B-TT20-SL130, 其中心波长为  $1\ 549.5\ \text{nm}$ , 线宽小于  $200\ \text{Hz}$ , 最大输出功率为  $180\ \text{mW}$ 。出射激光经光纤分束器 (1:99) 分为两束, 分别作为信号光和本振 (Local Oscillator, LO) 光。信号光先经过一个可调保偏单模光纤衰减器, 再经过一个声光移频器 (Acousto-optic Frequency Shifter, AOFS), 获得  $40\ \text{MHz}$  的固定频移, 模拟运动目标的多普勒频移信息, 随后到达  $1 \times 2$  保偏光纤耦合器 (50:50), 与另一束到达耦合器的本振光在光纤耦合器中进行拍频产生拍频光。拍频光经另一可调衰减器后到达 InGaAs-SPAD 探测器。依据多普勒测速公式<sup>[25]</sup>  $V = -\lambda \cdot \Delta f / 2$ , 当激光波长  $\lambda$ 、多普勒频移  $\Delta f$  分别为  $1.5\ \mu\text{m}$  和  $40\ \text{MHz}$  时, 对应的目标径向速度大小为  $30\ \text{m/s}$ 。实验采用的 InGaAs-SPAD 为 ID Quantique 公司生产的 id210, 其光谱响应范围为  $0.9\ \mu\text{m}$  至  $1.7\ \mu\text{m}$ 。自由运转模式下在  $1.5\ \mu\text{m}$  处的光子探测效率有  $2.5\%$ ,  $5\%$ ,  $7.5\%$  和  $10\%$  四个挡位, 与之相对应的是 id210 的四个暗计

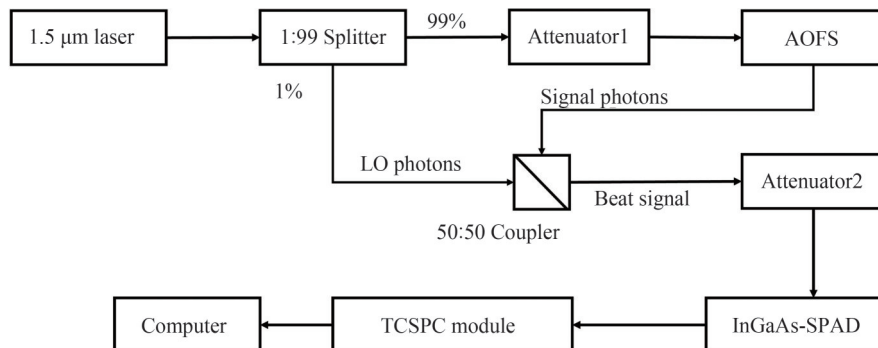


图 1 基于单光子探测的外差测速实验系统原理

Fig.1 Schematic of single photon heterodyne velocity measurement experimental system

数率挡位 1.8 kHz, 52.4 kHz, 194.4 kHz 和 313.6 kHz。这两个参数的内部调节机制是基于光子探测效率与 SPAD 偏置电压的正比关系, 以及暗计数率与 SPAD 偏置电压的正比关系。id210 探测器的光子探测时间分辨率为 200 ps, 最短死时间为 1  $\mu$ s。实验中, 设置 id210 为自由运转工作模式, 将其输出的光子探测脉冲信号连接至时间相关单光子计数模块 PicoHarp 300, 进行光子到达时间序列记录, 最小计时间隔为 4 ps。为降低数据量和计算成本, 调节 PicoHarp 300 的计时间隔与 SPAD 时间分辨率相同, 即 200 ps, 进行光子到达序列的记录。最后, PicoHarp 300 将光子到达时间序列数据传输至计算机进行处理, 采用快速傅里叶变换算法对拍频光信号的时域测量数据进行频谱重建。最终搭建的实验系统实物和系统参数分别如图 2 和表 1。

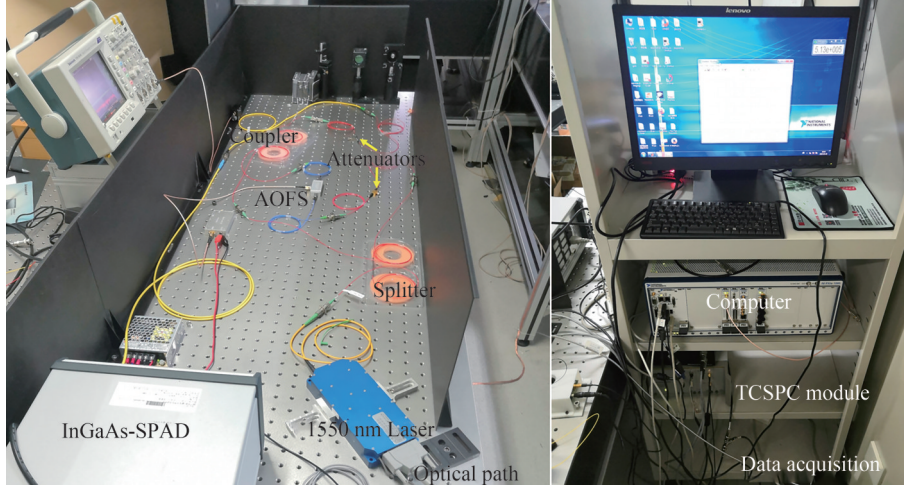


图 2 基于单光子探测的外差测速实验系统实物图

Fig.2 Photograph of single photon heterodyne velocity measurement experimental system

表 1 系统参数表  
Table 1 System parameters

Parameters	Value
Laser wavelength	1 549.5 nm
Laser linewidth	<200 Hz
Detector	InGaAs-SPAD
SPAD's dead time	1 $\mu$ s
SPAD's dark count rate	1.8 kHz, 52.4 kHz, 194.4 kHz
SPAD's quantum efficiency	2.5%, 5%, 7.5%
SPAD's time resolution	200 ps
Simulated velocity value	30 m/s
Acquisition time	1 ms

## 2 数据处理流程

相干探测系统的信号光与本振光拍频后的光功率可表示为

$$P_b = P_s + P_l + 2\sqrt{\eta P_s P_l} \cos(2\pi f_b t + \varphi) \quad (1)$$

式中,  $P_s$  为信号光功率,  $P_l$  为本振光功率,  $f_b$  为信号光与本征光拍频频率,  $\varphi$  为信号光与本征光相位差,  $\eta$  为拍频效率。由于光纤光学系统的空间角度准直程度和偏振匹配程度较好, 拍频效率  $\eta \approx 1$ <sup>[4]</sup>。不同于传统相干探测系统对光电流的模拟采样记录模式, 单光子相干探测系统只能响应光子的有无, 并记录光子到达的时间信息, 对拍频光信号的记录可表示为

$$I(t) = N_s + N_l + 2\sqrt{N_s N_l} \cos(2\pi f_b t + \varphi) + N_d \quad (2)$$

式中,  $N_s$  和  $N_l$  分别为信号和本振光子计数率,  $N_d$  为探测器的暗计数率。

图 3 为针对光子到达时间序列原始数据进行相干拍频信号频谱重建的数据处理流程。实验中, 原始数

据  $T_0 = \{t^{(\ell)}\}_{\ell=1}^k$  为一系列以 4 ps 分辨率记录的光子到达时间  $t^{(\ell)}$  的集合,  $\ell = 1, 2, \dots, k$ ,  $k$  表示在设定采集时间 (1 ms) 内共记录到的光子总数。由于  $T_0$  是一组离散的光子到达时间值而无法直接对其进行 FFT 运算。因此, 首先将其转化为以时间为横坐标, 以有无光子探测的 1 和 0 二值为纵坐标的向量数据  $T_1$ , 依据采集时间和时间分辨率可得到该 0/1 时变向量的长度为  $2.5 \times 10^8$ 。其次, 为减小数据量和计算成本, 进一步对  $T_1$  进行了 50 倍下采样, 等效于 200 ps 时间分辨。然后, 对降采样后得到的  $T_2$  进行 FFT 运算得出相干拍频信号的频谱。最后, 对频谱 SNR 进行分析。

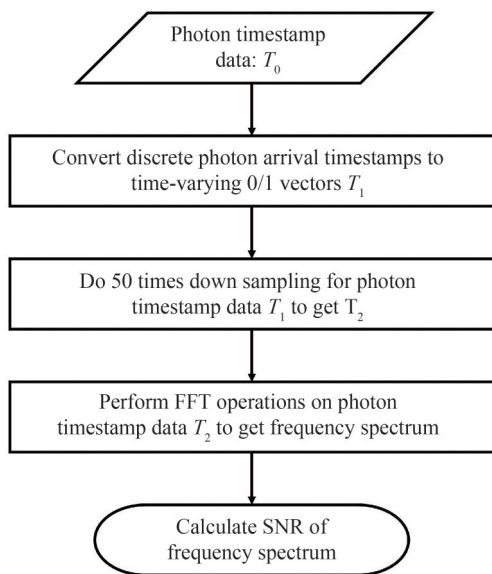


图3 相干拍频信号频谱分析数据处理流程

Fig.3 Data processing flow of coherent beat signal spectrum analysis

### 3 实验结果及分析

实验中, 采用声光移频器对信号光进行调制, 产生 40 MHz 的固定频移来模拟运动目标的多普勒频移。在 1  $\mu$ s 探测器死时间下分析了单光子探测器暗计数率 (Dark Count Rate, DCR) 和信号探测光子计数率 (Photon Detection Count Rate, PCR) 对相干拍频信号频谱重建的影响。暗计数率和光子探测效率是 SPAD 单光子探测器的两个重要性能参数, 都与 SPAD 探测器的偏置电压呈正比关系。暗计数是指无信号光子入射时由于 SPAD 内部热效应等因素产生的噪声计数, 而光子探测效率则是指 SPAD 将入射光子转换为探测电流脉冲的效率。在 SPAD 探测器的实际使用中, 通常希望作为 SPAD 探测器内部噪声的暗计数率足够低, 而同时又希望光子探测效率足够高以满足快速探测需求。因此, 通常需要依据实际应用需求对暗计数率与光子探测效率进行权衡。如前所述, 所采用的 ID Quantique 公司的 id210 近红外单光子探测器暗计数率共有四个挡位可以调节, 本文选择前三个挡位的暗计数率, 分析其对拍频信号频谱重建 SNR 的影响。

首先, 在系统可调节的最低暗计数率 1.8 kHz, 以及尽可能短的采集时间 1 ms 条件下, 通过可调偏光纤衰减器来调节信号探测光子计数率 (后文简称光子计数率)。在一组不同光子计数率 (134, 270, 428, 545, 640, 800, 902, 920 kHz) 条件下分别对拍频光时域数据进行采集。采用 FFT 方法对拍频光的频谱进行重建, 结果分别如图 4(a)~(h)。可以看出, 在上述系统参数设置下, 当光子计数率处于 134 kHz 至 920 kHz 范围, 均可以提取到 40 MHz 的拍频信号, 并且随着光子计数率的提高拍频光频谱的信噪比呈增大趋势。当光子计数率接近由 1  $\mu$ s 死时间决定的 1 MHz 饱和计数率时, 在图 4(g)、(h) 中可以观察到明显的谐波分量。但是由于在 1.8 kHz 的暗计数率挡位设置下, 超过 920 kHz 的光子计数率将导致单光子探测器 id210 提前饱和。造成提前饱和的可能原因为, 此暗计数挡位设置下, SPAD 探测器的死时间可能略微大于 1  $\mu$ s。提前饱和导致探测器输出的光子计数率降为 0, 无法完成计数, 不能进一步分析更接近饱和计数率下的频谱数据。在其他较高的两个暗计数率挡位下, SPAD 探测器的最高计数率可达到 1 MHz 的饱和计数率, 更接近饱和计数率的频谱数据中的谐波分量的特性在后文有具体分析。

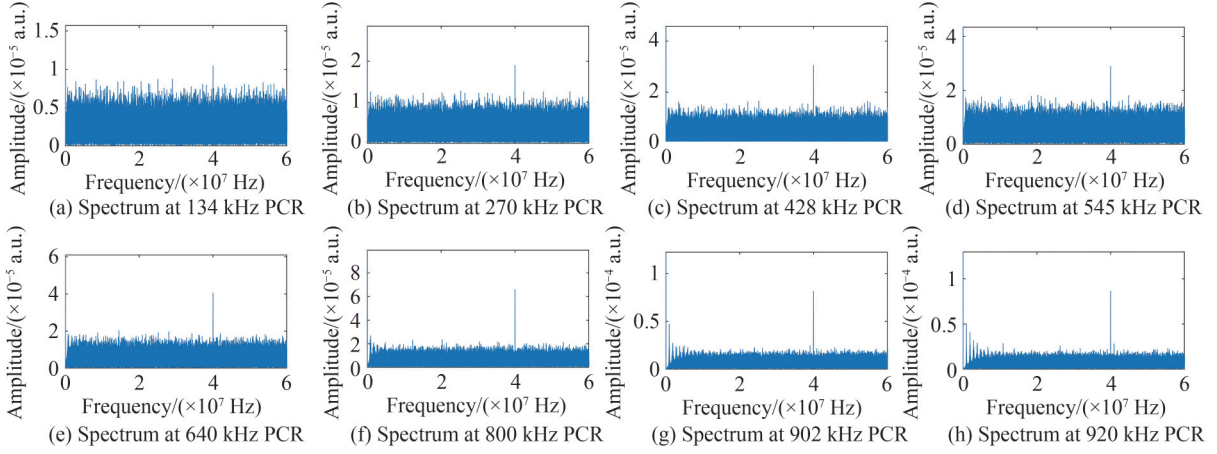


图4 光子计数率为134, 270, 428, 545, 640, 800, 902, 920 kHz情况下的拍频信号频谱, DCR=1.8 kHz

Fig.4 The spectrums of the beat frequency signal under PCR of 134, 270, 428, 545, 640, 800, 902 and 920 kHz, respectively, DCR=1.8 kHz

为定量分析不同光子计数率下的相干拍频信号提取效果,采用拍频信号频谱的SNR评价信号质量。SNR定义为信号幅值与噪声平均幅值之比,即

$$\text{SNR} = (S_p - N_{\text{avg}}) / N_{\text{avg}} \quad (3)$$

式中,  $S_p$  为信号区域的频谱的最大幅值,  $N_{\text{avg}}$  为噪声区域频谱的平均幅值, 进行平均计算时截取了除谐波分量和信号区域外的稳定噪声区域。图5(a)~(c)分别为相干拍频信号频谱的信号幅值、噪声幅值以及SNR随光子计数率的变化曲线。可以看出, 在达到920 kHz的光子计数率之前, 随着光子计数率的增加, 信号、噪声均呈现逐渐增大趋势, SNR也基本呈现逐渐增大趋势。仅在光子计数率为545 kHz时, 出现了与增加趋势不同的SNR变小的现象。基于后文中54.4 kHz和194.4 kHz两个暗计数率设定下的频谱SNR与光子计数率的关系曲线, 即光子计数率在达到饱和计数率的90%之前, 均呈现正相关关系, 可推断此处的SNR变小的原因为实验随机误差。

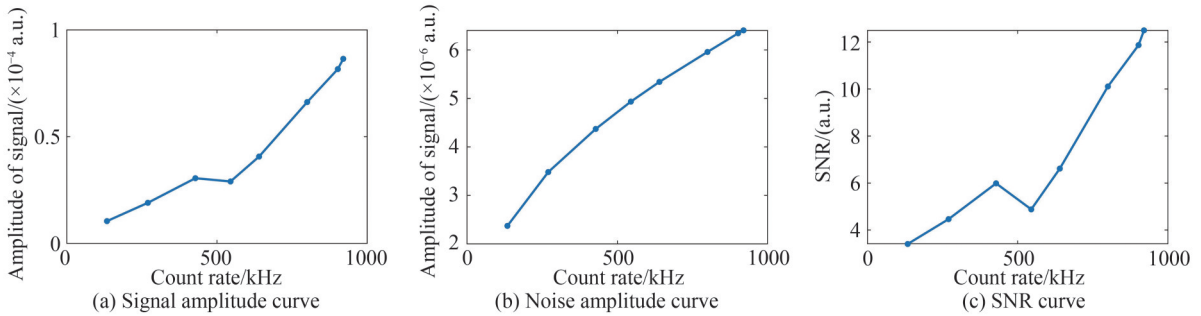


图5 不同光子计数率下的频谱信号幅值、噪声幅值及SNR, DCR=1.8 kHz

Fig.5 The signal amplitude, noise amplitude and SNR of spectrum under different PCR, DCR=1.8 kHz

其次, 保持SPAD探测器死时间和数据采集时间仍为1  $\mu\text{s}$  和1 ms设定不变, 调节SPAD探测器的暗计数率至52.4 kHz, 进行相干拍频信号频谱重建SNR的分析实验。实验发现在52.4 kHz暗计数率下, 光子计数率可达到1 MHz, 并且可以略微超过1 MHz, 说明此暗计数率挡位下的SPAD探测器死时间略微小于1  $\mu\text{s}$ 。为进一步观察和分析接近饱和计数时的拍频信号频谱数据提供了条件。

图6为光子计数率在200 kHz至1 009 kHz范围变化时获取到的相应的相干拍频信号频谱图。表2中列出了相应光子计数率下的拍频信号频谱的信号幅值、噪声幅值以及SNR计算结果。从图6(a)、(b)可以看出, 在探测器死时间和数据采集时间保持不变条件下, 与低暗计数率相比, 在高暗计数率下需要更高的光子计数率(350 kHz)才能提取到40 MHz的拍频信号。而低暗计数率下, 134 kHz的光子计数率即可提取到拍频信号。同时, 从表2中观察到随着光子计数率逐渐增加到饱和计数率1 MHz, 拍频信号频谱的SNR先增

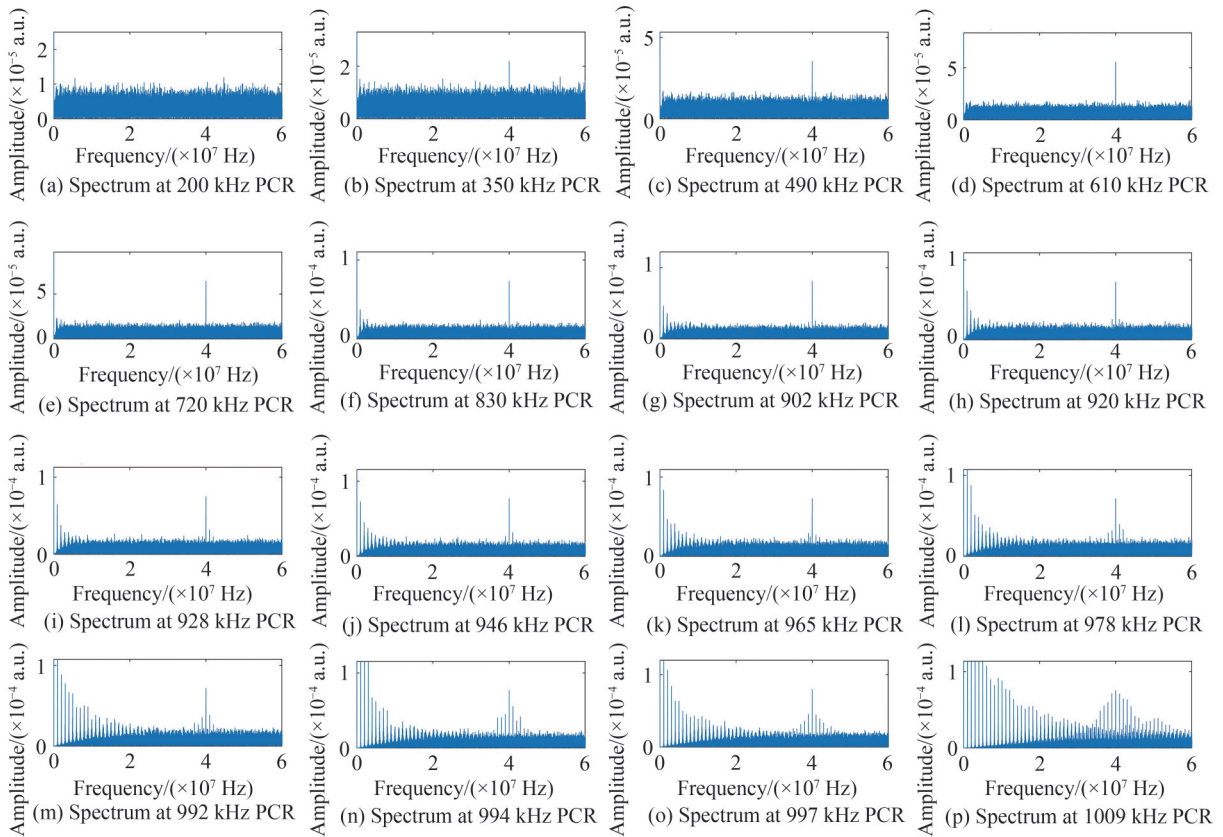


图6 光子计数率为200、350、490、610、720、830、902、920、928、946、965、978、992、994、997、1 009 kHz情况下的拍频信号频谱, DCR=52.4 kHz

Fig.6 The spectrums of the beat frequency signal under PCR of 200, 350, 490, 610, 720, 830, 902, 920, 928, 946, 965, 978, 992, 994, 997 and 1 009 kHz, DCR=52.4 kHz

表2 不同光子计数率下的频谱信噪比, DCR=52.4 kHz  
Table 2 SNR of spectrum under different photon count rates, DCR=52.4 kHz

PCR/kHz	200	350	490	610	720	830	902	920
SNR	0.9	4.5	6.6	9.6	10.4	11.1	<b>11.8</b>	10.3
PCR/kHz	928	946	965	978	992	994	997	1 009
SNR	10.6	10.9	10.1	9.8	9.8	10.6	11.0	10.3

大后趋于平稳,且SNR的最大值11.8出现在902 kHz光子计数率处。通过观察接近饱和计数率时的频谱图6(h)~(p)可知,越接近探测器饱和计数率,谐波分量对频谱中的信号分量的影响越严重。具体表现为,随着光子计数率的增加,首先在频谱低频区域出现等间距的谐波分量,随后在拍频频率的两侧也出现了频率间距相等谐波分量。

图7(a)、(b)、(c)为图6(j)、(m)、(p)的局部放大图,用以观察和分析谐波分量的频率间隔 $\Delta f$ ,分别对应于光子计数率为946 kHz、992 kHz和1 009 kHz的拍频频谱。以40 MHz为中心选取左右0.5 MHz频率范围进行局部显示。对频率范围内的谐波频率间隔进行均值统计,分别计算得到 $\Delta f_1$ 、 $\Delta f_2$ 和 $\Delta f_3$ 分别为950.4 kHz、994.8 kHz和1 012.8 kHz。可以看出,这些频率间隔实际上与相应的光子计数率数值大小基本一致。图8为信号幅值、噪声幅值和SNR随光子计数率的变化趋势图。可以看出,信号幅值随着光子计数率的增加先增大后趋于稳定,噪声幅值随着光子计数率的增加而增大,从而使得SNR随着光子计数率增加而呈现出先增大后略微降低的趋势。SNR最大的点出现在光子计数率为902 kHz时,即为饱和计数率的90%。对应的频谱如图6(g),虽然在低频区域已经产生了谐波分量,但是在拍频频率分量附近的谐波并不明显,呈现了比较好的信噪比。随着光子计数率的进一步增大,拍频频率附近的谐波幅值逐渐增大,拍频信号幅值不再增加。

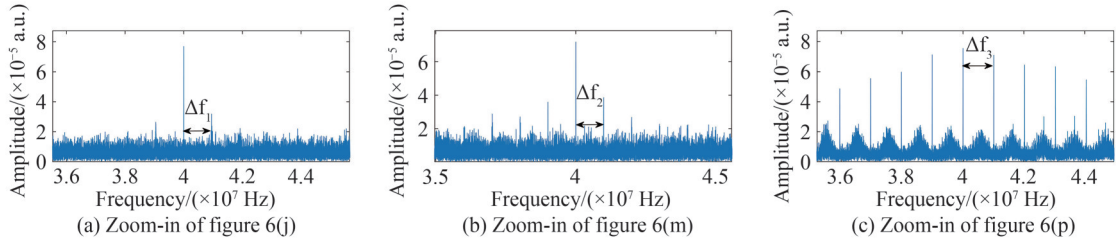


图7 局部放大的图6(j)、(m)、(p)中的谐波分量

Fig.7 Enlarged partial view of harmonic components in Fig.6(j), (m), (p)

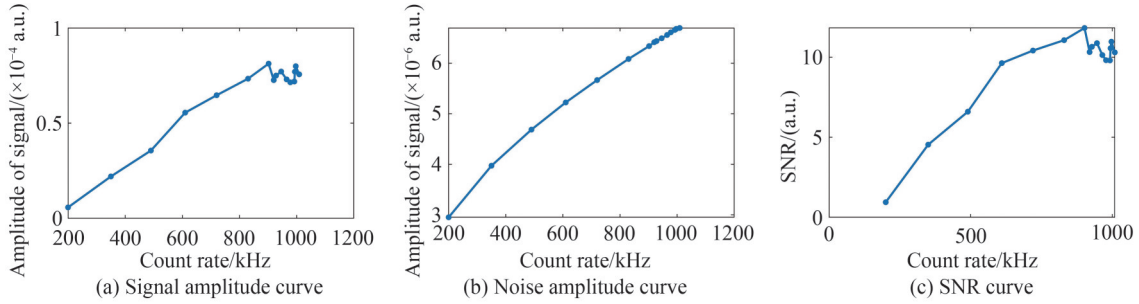


图8 不同光子计数率下的频谱信号幅值、噪声幅值及SNR, DCR=52.4 kHz

Fig.8 The signal amplitude, noise amplitude and SNR of spectrum under different PCR, DCR=52.4 kHz

最后,调节探测器暗计数率为高挡位 194.4 kHz。图 9(a)~(h)为不同光子计数率下(483, 607, 712, 801, 908, 960, 996, 1 002 kHz)获取到的拍频信号频谱图。随着暗计数率的进一步提高,相同采集时间下需要更高的光子计数率(483 kHz 以上)才能实现拍频信号获取。随着光子计数率逐渐接近探测器饱和计数率,类似于图 7 的分析结果,频率间距与光子计数率数值基本相等的谐波分量变得逐渐明显。不同光子计数率下的拍频信号频谱的信号幅值、噪声幅值以及 SNR 计算结果如表 3,相应的变化曲线如图 10。可以看出,当光子计数率大于 900 kHz 时,SNR 同样也逐渐趋于平稳,与前述两个不同暗计数率挡位设置下的 SNR 随光子计数率变化趋势基本一致。

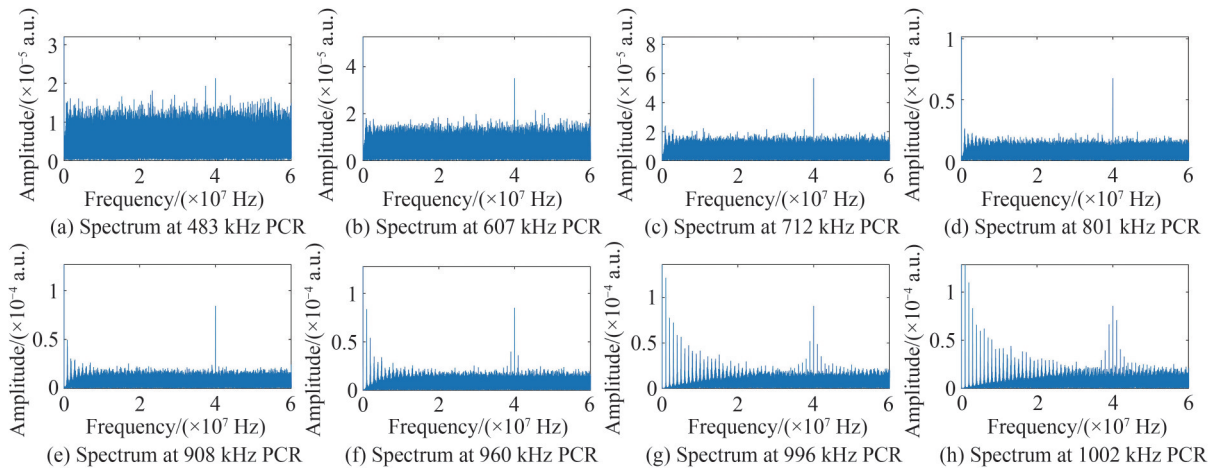


图9 不同光子计数率下的拍频信号频谱, DCR=194.4 kHz

Fig.9 The spectrum of the beat frequency signal under different photon count rates, DCR=194.4 kHz

表3 不同光子计数率下的频谱信噪比, @DCR=194.4 kHz

Table 3 SNR of spectrum under different PCR, @DCR=194.4 kHz

PCR/kHz	483	607	712	801	908	960	996	1 002
SNR	3.6	5.7	9.1	10.3	12.2	12.0	12.6	11.8

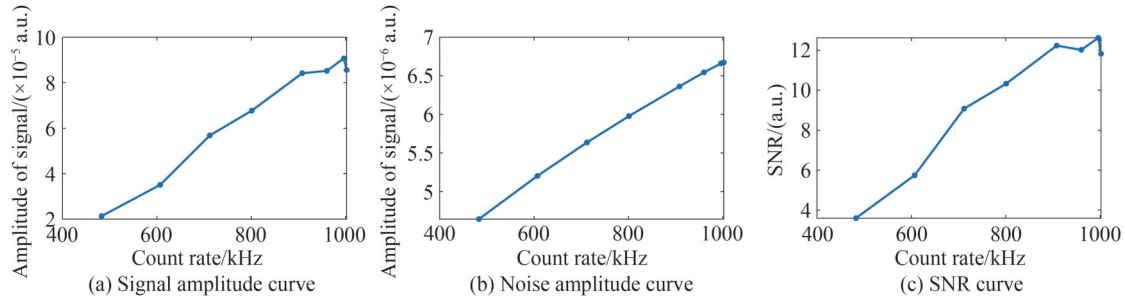


图10 不同光子计数率下的频谱信号幅值、噪声幅值及SNR, DCR=194.4 kHz

Fig. 10 The signal amplitude, noise amplitude and SNR of spectrum under different PCR, DCR=194.4 kHz

## 4 结论

本文实验分析了 $1\ \mu\text{s}$ 单光子探测器死时间下,不同的探测器暗计数噪声和信号探测光子计数率对基于近红外单元SPAD相干测速性能的影响。首先,搭建了一套基于单元InGaAs-SPAD的外差测速实验系统,采用声光移频器对信号光进行调制产生40 MHz的固定频移来模拟运动目标的多普勒信息。然后,在 $1\ \mu\text{s}$ 探测器死时间、1 ms数据采集时间条件下,分析了1.8 kHz、54.4 kHz和194.4 kHz三种探测器暗计数率下不同光子计数率对拍频光谱SNR的影响。实验结果表明:1)频谱SNR随着光子计数率的增大先增大后趋于平稳,平稳点约为单光子探测器饱和计数率的90%;2)当光子计数率接近饱和计数率时,在频谱的低频区域和拍频频率两侧会出现谐波分量,谐波频率间距与光子计数率数值基本相等;3)随着单光子探测器暗计数率的增加,提取拍频信号所需要的光子计数率越高。研究结果可为全光纤单光子多普勒测速激光雷达技术的发展和实际应用提供参考,下一步将开展针对实际运动目标的速度测量的实验研究。

### 参考文献

- [1] KAMEYAMA S, ANDO T, ASAKA K, et al. Compact all-fiber pulsed coherent doppler lidar system for wind sensing [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [2] KLIEBISCH O, UITTENBOSCH H, THURN J, et al. Coherent Doppler wind lidar with real-time wind processing and low signal-to-noise ratio reconstruction based on a convolutional neural network[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5540-5552.
- [3] MAHNKE P, DAMM M, KLIEBISCH O. Experimental airborne four channel cw-Laser-Doppler-Anemometer for flight instrumentation[C]. in *Proceedings of the 21st Coherent Laser Radar Conference*, 2022:1-3.
- [4] LI Bin, LEI Hongjie, JIN Wenhua, et al. Approach for measuring the optimal local optical power of coherent detection system (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(10): 1004005.  
李彬, 雷宏杰, 靳文华, 等. 相干探测系统最佳本振光功率测量方法(特邀) [J]. *光子学报*, 2021, 50(10): 1004005.
- [5] ZHANG Heyong, WANG Tingfeng, JIANG Runqiang. Photon counting coherent detection based on all solid state single frequency laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0608002.  
张合勇, 王挺峰, 姜润强. 基于全固态单频激光器的光子计数相干探测[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0608002.
- [6] JIANG L A, LUU J X. Heterodyne detection with a weak local oscillator[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1486-1503.
- [7] GUO Yanqiang, WANG Lijing, WANG Yu, et al. Analysis and measurement of high-order photon correlations of light fields[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(17): 283-293.  
郭龔强, 王李静, 王宇, 等. 光场高阶光子关联的分析与测量[J]. *物理学报*, 2020, 69(17): 283-293.
- [8] KIRCHNER G, KOIDL F. Graz kHz SLR system: design, experiences, and results [C]. in *Proceedings of the 14th International Workshop on Laser Ranging*, 2004:1-6.
- [9] MCGARRY J F, HOFFMAN E D, DEGNAN J J, et al. NASA's satellite laser ranging systems for the twenty-first century[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 2249-2262.
- [10] LI Zhengping, YE Juntian, HUANG Xin, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [11] KANG Yan, LI Lifei, LIU Dawei, et al. Fast long-range photon counting depth imaging with sparse single-photon data [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7500710.
- [12] TAN Changsheng, KONG Wei, HUANG Genghua, et al. Design and demonstration of a novel long-range photon-counting 3D imaging LiDAR with  $32\times 32$  transceivers[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2851.
- [13] MACCARONE A, MCCARTHY A, REN Ximing, et al. Underwater depth imaging using time-correlated single-photon counting[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33911-33926.



- [14] MACCARONE A, DRUMMOND K, MCCARTHY A, et al. Submerged single-photon LiDAR imaging sensor used for real-time 3D scene reconstruction in scattering underwater environments[J]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 16690–16708.
- [15] SHANGGUAN Mingjia, XIA Haiyun, WANG Chong, et al. Dual-frequency Doppler lidar for wind detection with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3541–3544.
- [16] LUU J X, JIANG L A. Saturation effects in heterodyne detection with Geiger-mode InGaAs avalanche photodiode detector arrays[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3798–3804.
- [17] LUU J X, JIANG L A. Coherent photon counting lidar[C]. *Coherent Optical Technologies and Applications*, OSA, 2006: CWB5.
- [18] LIU Lisheng, ZHANG Heyong, GUO Jin, et al. Photon time-interval statistics applied to the analysis of laser heterodyne signal with photon counter[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(18): 3820–3826.
- [19] LOBANOV Y, SHCHERBATENKO M, SEMENOV A, et al. Superconducting nanowire single photon detector for coherent detection of weak signals[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 7(4): 1–5.
- [20] CHEN Zhen, LIU Bo, GUO Guangmeng, et al. Photon counting heterodyne with a Single photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(17): 931–934.
- [21] LU Wei, SHI Xiaojing, SUN Jianfeng, et al. Improving the signal-to-noise ratio of GM-APD coherent lidar system based on phase synchronization method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 150: 107994.
- [22] GE Weijie, SUN Jianfeng, LU Wei, et al. Photon arrival sequence analysis of laser heterodyne signal with a Geiger-mode APD array[J]. *Optics Communications*, 2022, 523: 128723.
- [23] AULL B F, DUERR E K, FRECHETTE J P, et al. Large-format Geiger-mode avalanche photodiode arrays and readout circuits[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 3800510.
- [24] SUN Minjie, WANG Zhiguan. Research progress of imaging technology based on single photon avalanche diode arrays (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(8): 0851510.  
孙鸣捷, 王知冠. 基于单光子雪崩二极管阵列的成像技术研究进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(8): 0851510.
- [25] MOCKER H W, WAGENER T J. Laser Doppler optical air-data system: feasibility demonstration and systems specifications[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(27): 6457–6471.

## Experimental Analysis of Coherent Velocity Measurement Based on Near-infrared Single-element SPAD Detector

LI Bin<sup>1</sup>, WANG Xiaofang<sup>2,3</sup>, KANG Yan<sup>2</sup>, YUE Yazhou<sup>1</sup>, LI Weiwei<sup>2,3</sup>, ZHANG Yixin<sup>1</sup>,  
LEI Hongjie<sup>1</sup>, ZHANG Tongyi<sup>2,3</sup>

(1 *Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710065, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Coherent lidar has advantages of suppressing background noise such as sunlight and detecting sensitivity close to shot noise limit. It is widely used in civil and defense fields such as wind detection, velocity measurement and military target detection. Coherent detection can be divided into heterodyne detection to extract frequency information and homodyne detection to extract phase information. For velocity measurement, heterodyne detection is usually used to extract the Doppler frequency shift of the echo laser from a moving target, and then the velocity of target is retrieved. Conventional heterodyne lidar adopt normal optical detectors, such as PIN detectors, which have limited detection sensitivity for a small number of echo photons. And generally, strong local oscillator laser power is required to suppress thermal and circuit noise, but excessive local oscillator is likely to generate excess shot noise. With the development of Single Photon Avalanche Diode (SPAD) detector with low circuit noise, it not only provides a way for the detection of a small number of echo photons, but also makes it possible to realize heterodyne detection with a weak local oscillator. Researchers have successively adopted InGaAs SPAD array detectors and superconducting nanowire single-photon detectors for near-infrared spectrum, single-element Si SPAD detectors and MPPC detectors for visible spectrum, but there have been few experimental research on heterodyne detection with single-element InGaAs SPAD detector. The heterodyne lidar based on near-infrared

SPAD can be integrated in all-fiber structure with an operating wavelength of 1.5  $\mu\text{m}$ , which makes it more suitable for practical working platforms such as airborne. Although the count rate dynamic range of the single-element SPAD is not as good as that of the SPAD array, the current disadvantages of SPAD array, such as low pixel fill-factor, poor uniformity of pixel performance (e.g., hot pixel), and slow speed of data readout, limit its performance to a certain extent. Besides, compared with superconducting nanowire single-photon detectors, single-element near-infrared SPAD do not require extremely complex and bulky cooling system. Therefore, we established a heterodyne velocimetry experimental system based on a 1.5  $\mu\text{m}$  fiber laser and a single-element InGaAs SPAD detector to analyze the influence of SPAD's dead time, dark count rate and photon count rate for the extracting of beat frequency. The output laser was shifted by 40 MHz using an Acousto-optic Frequency Shifter (AOFS) to simulate the Doppler frequency shift of the echo laser from a moving target. Then, under the experimental set up of 1  $\mu\text{s}$  dead time and 1 ms data acquisition time, we analyzed the influence of different photon count rates on the SNR of the beat frequency spectrum under SPAD's dark count rates of 1.8 kHz, 54.4 kHz and 194.4 kHz. The experimental results show that, the SNR increases gradually and then tends to be stable with the increase of the photon count rate. When the photon count rate is close to saturation, harmonic frequency components appear in the low-frequency area of the frequency spectrum as well as the two side regions centered on the beat frequency. The harmonic frequency spacing is basically equal to the photon count rate. The optimal photon count rate which is slightly affected by harmonics is about 90% of saturation count rate of SPAD detector. In addition, as the dark count rate increases, the photon count rate required to extract the beat frequency signal is higher. The experimental results can provide a reference for the development and practical application of all-fiber single-photon Doppler velocity measurement lidar technology.

**Key words:** Coherent detection; Photon counting; Heterodyne detection; Doppler; Velocity measurement

**OCIS Codes:** 040.2840; 280.3340; 280.3640; 060.2840; 030.5260